

---

УДК 621.372

*Н. Н. ПРЕНЦЛАУ*, канд. техн наук, *А. П. БЕСКОРСЫИ*,  
*И. Ф. ХАРЧЕНКО*, д-р физ.-мат. наук, *М. Н. ОФИЦЕРОВ*, *И. Е. ОРЛОВ*

**ПОВЫШЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ ОХЛАЖДАЕМЫХ РЕЗОНАНСНЫХ  
СИСТЕМ ТЕРМООБРАБОТКОЙ**

---

При охлаждении резонансных систем до температуры ниже азотного уровня их добротность может возрастать более чем на порядок [1]. Механическая обработка поверхности резонансных систем при их изготовлении вызывает разрушение и деформацию кристаллической структуры поверхностного слоя металла.

Это приводит к увеличению омических потерь. Поэтому для обеспечения высокой добротности поверхностный слой необходимо удалять электрополированием либо восстанавливать его кристаллическую структуру термообработкой, т. е. отжигом. Обработка поверхности электрополированием позволяет достигнуть поверхностного сопротивления  $R_s$ , близкого к расчетному. Однако электрополирование поверхностей не всегда возможно, особенно для элементов со сложной геометрической формой поверхности. Поэтому предпочтителен отжиг металла после его механической обработки.

Рекомендации о выборе режимов отжига, приведенные в литературе, противоречивы и связаны с рассмотрением механических свойств металлов либо поведения удельного сопротивления  $\rho$  [2; 5]. Обычно температуру отжига  $T_0$  приравнивают к температуре рекристаллизации  $T_p$ , а последнюю выражают в функциональной зависимости от температуры плавления  $T_{пл}$ . По правилу Бочвара  $T_p = (0,3 \div 0,4) T_{пл}$ . Формулы Эспе и Лимпта обеспечивают функциональную зависимость  $T_p$ ,  $T_{пл}$  и время отжига  $t$ . Однако существует значительное расхождение между значением температуры начала рекристаллизации и экспериментально определяемой температурой отжига для получения минимальных значений  $\rho$ . Поэтому рекомендуемая температура отжига  $T_0 \approx 0,5 T_{пл}$  [2]. Графически представленная в работе [3] зависимость  $\rho_{300} = F(T_0)$  меди подтверждает справедливость указанной рекомендации. Здесь и далее цифровые обозначения при удельных сопротивлениях  $\rho$ , добротностях  $Q$  и  $R_s$  обозначают температуру измерения. При  $T_0 = 0,5 T_{пл}$   $\rho_{4,2}$  меди минимально, а если  $T_0 > 0,5 T_{пл}$ , оно увеличивается с повышением  $T_0$  [4].

Подобная неоднозначность рекомендаций выбора температуры отжига существует и для алюминия. Для получения минимального значения  $\rho$  чистого алюминия достаточна температура отжига порядка  $0,6 T_{пл}$ . Слаболегированные сплавы алюминия отжигаются при температуре  $(0,7 \div 0,95) T_{пл}$  [5].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования зависимости добротности резонансных систем в дециметровом диапазоне длин волн от температуры отжига для электротехнической меди, алюминия марок А9995 и А997, а также медного провода, покрытого серебром. Показана зависимость добротности резонансной системы от времени отжига при оптимальной температуре  $T_{опт}$ . Измерения проводились на частоте порядка 400 МГц. Объектом измерения служил полувольновый коаксиальный спиральный резонатор с разомкнутыми концами спирали. Такая конструкция была выбрана благодаря возможности легкой замены наблюдаемых внутренних проводников. Спирали изготавливали путем протяжки исследуемого материала через фильеру с последующей навивкой проволоки на тефлоновый каркас. Во время отжига спираль свинчивалась с каркаса, а процесс проводился в камере при вакууме около  $10^{-8}$  мм рт. ст. Изучая температурную зависимость добротности резонатора от режима отжига, его подвешивали на линиях связи в криостате, паргелия полностью проходил через полость резонатора. Это обеспечивало одинаковую температуру на элементах. Температура резонатора регулировалась изменением температуры пара гелия, проходящего через полость резонансной системы, и контролировалась полупроводниковым датчиком, который помещали внутри резонатора. Все спирали, рассматриваемые на переменном токе частотой приблизительно 400 МГц, исследовались также на постоянном токе четырехзондовым методом.

На рис. 1 изображены температурные зависимости  $\rho(T)$  и  $Q_{\text{пр}}$  электротехнической меди (позиции *a, б* соответственно) при различных отношениях  $T_0 / T_{\text{пл}}$ . Здесь  $Q_{\text{пр}} = Q_{300} / Q(T_0, T)$  — отношение  $Q_{300}$  неотожженного резонатора к  $Q(T_0, T)$  резонаторов, отожженных при различных температурах. Отметим, что обсуждаемые отношения  $Q_{\text{пр}}$  справедливы для любых конструкций резонансных систем на этой частоте, что следует из соотношения  $R_s = G/Q$ , где  $G$  — геометрический фактор, практически не зависящий от температуры и термообработки. Рассматривая величину  $Q_{\text{пр}}$ , мы тем самым оперируем

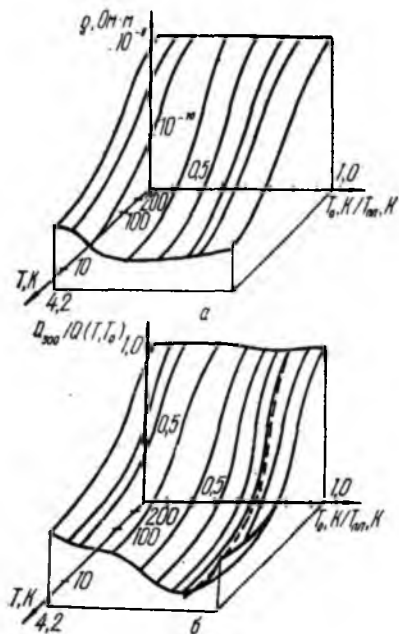


Рис. 1

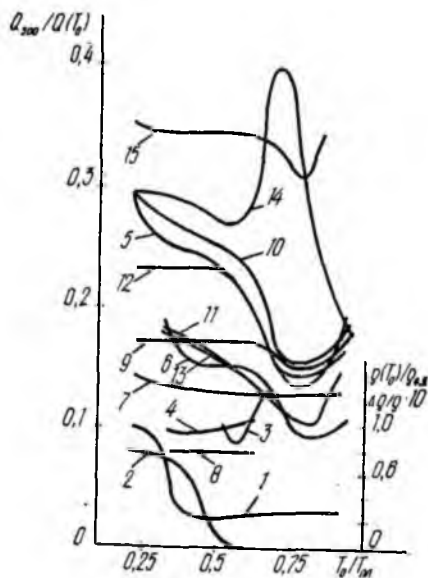


Рис. 2

температурной зависимостью поверхностного сопротивления, приведенного к  $R_{s300}$ , которое не зависит от типа резонатора на одной и той же частоте.

Из рис. 1 видно, что  $\rho_{300}$  и  $Q_{300}$  меди не зависят от термообработки, но по мере снижения рабочей температуры металла к значениям  $20 \div 4,2$  К ее влияние увеличивается. Для алюминия марок А9995 и А997 были получены температурные зависимости  $Q = F(T_0)$ , подобные представленным на рис. 1 для меди.

В температурном диапазоне  $20 - 4,2$  К влияние отжига наиболее ощутимо. Однако в работе [1] показано, что добротность резонансных систем при их охлаждении ниже водородных температур ( $< 20$  К) незначительно изменяется. Для удобства эксперимента рассмотрим влияние отжига на характеристики резонансных систем, охлажденных до температуры жидкого гелия (4,2 К).

На рис. 2 кривая 1 отражает отношение электросопротивлений отожженной при различных температурах  $T_0$  и неотожженной меди при гелиевой температуре  $\rho_{4,2}(T_0)/\rho_{4,2}$ . Для сравнения здесь же (кривые 2, 3) представлены зависимости  $\Delta\rho_{300}(T_0)/\rho_{300}$  [3] и отношение  $\rho_{4,2}(T_0)$  к  $\rho_{4,2}$  меди, отожженной при 720 К. Отношение вычислено по экспериментальным данным [4]. Из рисунка следует, что при воздействии на медь температурой, близкой к началу рекристаллизации, ее удельное сопротивление достигает минимального значения и с повышением  $T_0$  остается постоянным [3] либо увеличивается.

Данные экспериментального исследования влияния термообработки на  $\rho_{4,2}$  алюминия А9995 свидетельствуют о том, что, как и для меди, существует  $T_{\text{отт}} \cong 0,45 T_{\text{пл}}$  (кривая 4). Экспериментальные кривые рис. 2 показывают, что при отжиге для получения малых значений  $\rho$  следует использовать температурный интервал (0,45—0,55)  $T_{\text{пл}}$ . Это не противоречит известным рекомендациям [2].

Однако этот температурный интервал отжига не обеспечивает максимальное значение  $Q_{4,2}$ . Кривая 5 рис. 2 представляет собой зависимость  $Q_{300}/Q_{4,2} = F(T_0/T_{\text{пл}})$  для меди, а кривая 6 — ту же зависимость для алюминия марки А9995. Отсюда видно, что отжиг при  $T_0 < T_{\text{отт}}^0$  в меньшей степени влияет на  $Q_{4,2}$ , чем при  $T_0 > T_{\text{отт}}^0$ . Максимальное значение  $Q_{4,2}$  достигается при  $T_0 \approx 0,75 T_{\text{пл}}$ , а если  $T_0 > 0,75 T_{\text{пл}}$ , ее значение снижается. С повышением температуры отжига от  $T_{\text{отт}}^0$  до  $0,75 T_{\text{пл}}$ , согласно экспериментальным данным,  $\rho_{4,2}$  меди растет (кривая 1), а  $R_s$  снижается (кривая 5). Значение  $R_s$  для алюминия в этих температурных пределах падает столь же круто, как и для меди, несмотря на то что  $\rho$  алюминия изменяется незначительно. Таким образом, рис. 1, 2 позволяют сделать вывод о некорреляционной зависимости между  $\rho_{4,2} = f(T_0)$  и  $Q_{4,2} = f(T_0)$ , что противоречит уравнениям Зондгеймера и Чемберса для  $\rho$  и  $R_s$  в области аномального скин-эффекта, приведенным ранее [1].

Для подтверждения этого на рис. 2 представлены зависимости  $Q_{300}/Q(T_0)$  от  $T_0/T_{\text{пл}}$  меди (кривая 7) и алюминия (кривая 8), рассчитанные исходя из экспериментальных значений  $\rho_{4,2}$  (кривые 1, 4) с помощью формулы Чемберса. Из них следует, что только при  $T_0 \approx 0,75 T_{\text{пл}}$  различие расчетных значений  $Q_{4,2}$ , вычисленных по известному  $\rho$ , и экспериментальных не превышает примерно 10%. В других режимах термообработки измеренное при криогенных температурах значение  $Q$  может отличаться от расчетного в несколько раз. После отжига, когда  $T_0 \approx 0,75 T_{\text{пл}}$ , расчетное и экспериментальное значения  $Q$  незначительно различаются во всем рабочем температурном диапазоне. На рис. 1, б расчетное значение  $Q_{\text{пр}}$  показано пунктиром.

Резонатор из слабдеформированной неотожженной меди обеспечивает более высокую добротность (кривая 9 рис. 2) по сравнению с неотожженной сильнодеформированной медью (кривая 5), которая не изменяется с повышением температуры отжига до  $T_0$ , соответствующей равенству добротностей резонаторов из сильно- и слабдеформированной меди. При отжиге выше этой температуры характер зависимостей  $Q_{300}/Q_{4,2}(T_0)$  обоих резонаторов одинаков.

Строя кривую 5, использовали результаты экспериментальных измерений добротности десяти резонаторов, каждый из которых отжигался при температуре в интервале  $(0,2 \div 0,9) T_{пл}$  с шагом  $100^\circ\text{C}$ . На кривой 10 представлена зависимость  $Q_{300}/Q_{4,2}(T_0)$  одного резонатора при последовательном отжиге в том же интервале и с тем же шагом.

Характер кривой зависимости  $Q_{300}/Q_{4,2}(T_0)$  для технического алюминия марки А997 (кривая 11) практически не отличается от этой же зависимости для чистого алюминия марки А9995. Максимальные значения добротности резонаторов из этих металлов достигаются при одной и той же температуре отжига ( $\sim 0,8 T_{пл}$ ), и по абсолютному значению они равны [1].

Из сравнения кривых, характеризующих  $Q_{4,2} = F(T_0)$  исследуемых металлов, следует, что максимальные значения  $Q_{4,2}$  резонансных систем дециметрового диапазона достигаются при отжиге в температурном интервале  $T_0 = (0,75 \div 0,83) T_{пл}$ , который принимается за оптимальный  $T_{опт}^R$ .

Неотожженные медные и алюминиевые резонаторы со временем повышают добротность, что связано с отпускком металлов. Кривые 12, 13 представляют собой те же зависимости, что и 5, 6 для тех же резонаторов, но последние измерены через 1,5 года после их изготовления (и соответственно после измерений, данные которых отражены на кривых 5, 6). Из сравнения кривых 5 — 12 и 6 — 13 следует, что наибольшее повышение добротности наблюдается у неотожженных резонаторов. Начало кривых 5, 6, 12, 13 соответствует температуре отжига примерно 300 К, т. е. неотожженному состоянию металла. Однако повышение температуры отжига снижает разность значений добротностей этих резонаторов, и при некоторых значениях температуры отжига  $T'_0$  добротности «выдержанных» длительное время и измеренных после изготовления резонаторов совпадают. В интервале температур отжига  $T'_0 < T_0 < T_{опт}^R$  добротности резонаторов различаются незначительно. При  $T_{опт}^R$  добротность медного резонатора, «выдержанного» в течение 1,5 года, ниже, чем у измеренного после изготовления на 10%, а у алюминиевых, измеренных через 2 года, этот показатель практически совпадает. При  $T_0 > T_{опт}^R$  значение  $Q_{4,2}$  для «выдержанных» резонаторов несколько выше.

Отжигаемая до  $T_0 \sim 0,5 T_{пл}$  поверхность покрытой серебром меди обеспечивает добротность ниже, чем поверхность меди без покрытия, на 15—20 % (рис. 2, кривая 14), при этом характер зависимости  $Q_{300}/Q_{4,2}(T_0)$  для серебряного покрытия и для меди аналогичен. Если  $T_0 > 0,5 T_{пл}$ , серебряное покрытие начинает растворяться в меди, что подтверждается появлением на рабочей поверхности участков  $\alpha$  меди. В результате образуется соединение с проводимостью ниже, чем у чистой меди. В связи с этим в диапазоне температур отжига  $0,6T_{пл} < T_0 < 0,7T_{пл}$  добротность значительно падает, а на поверхности меди весь слой серебра растворяется. Когда  $T_0 > 0,7T_{пл}$ , значение  $Q_{4,2}$  повышается, что, по-видимому, объясняется влиянием

медной поверхности на добротность. Тогда ( $T_0 = 0,9T_{пл}$ )  $Ag \approx (T_{\text{отж}}^{R_s})Cu$ . Серебряное покрытие практически во всем диапазоне его работы обеспечивает меньшую добротность, чем в случае чистой меди, а отжиг при  $T_{\text{отж}}^{R_s}$  снижает ее еще больше, чем у чистой меди, исследуемой при температуре жидкого азота (кривая 15).

На рис. 3 даны зависимости  $Q_{300}/Q_{4,2}$  от времени отжига при  $T_{\text{отж}}^{R_s}$  (кривая 1) и  $\rho_{\text{пр}} = F(t)$  (кривая 2). Здесь  $\rho_{\text{пр}}$  — отношение удельных сопротивлений отожженной при  $T_{\text{отж}}^{R_s}$  меди и неотожженной при температуре 4,2 К. Из кривых следует, что восстановление свойств меди происходит в первые 15 мин отжига. Увеличение времени отжига слабо сказывается на снижении сопротивления. В процессе отжига в течение малого промежутка времени наблюдается некоторый разброс в результатах эксперимента, который снижается с увеличением времени отжига. Точками и кружками на кривой 1 обозначены данные измерения одного и того же образца через один месяц. При времени отжига более часа разбросов значений  $Q_{4,2}$  не наблюдается.

Представленные на рис. 1, 2 зависимости от температуры отжига получены при продолжительности отжига 4 ч, а время

нарастания температуры отжига до заданной и спада температуры после выключения нагревателя до  $50^\circ\text{C}$  находится в пределах 30 мин.

Электрополировка поверхности отожженного при  $T_{\text{отж}}^{R_s}$  металла практически слабо влияет на добротность. Очевидно, это связано с тем, что сам отжиг позволяет получить добротность резонансной системы только на 15 — 20 % ниже по сравнению с расчетным значением (см. рис. 2). Однако электрополировка неотожженного металла по-разному влияет на добротность резонансных систем. В случае слабой деформации поверхности удаление электрополировкой деформированного слоя меди на 20 мкм двукратно повышает добротность резонансных систем. При значительной деформации алюминиевой поверхности даже удаление слоя в 200 мкм практически не влияет на повышение добротности.

Таким образом, проведенные эксперименты показали следующее. Оптимальная температура отжига металлов (медь, алюминий марок А9995, А997), позволяющая достичь максимальных добротностей резонаторов в дециметровом диапазоне длин волн,  $T_{\text{отж}}^{R_s} \approx (0,75 + 0,85) T_{пл}$ . Чтобы получить минимальные значения удельного сопротивления  $\rho$ , значение  $T_{\text{отж}}^0$  не должно превышать  $(0,45 + 0,55) T_{пл} \sim T_{\text{отж}}^0$ , что соответствует приведенным в литературе рекомендациям. Во всем температурном диапазоне, кроме  $T_{\text{отж}}^{R_s}$ , отсутствуют корреляционные зависимости между  $R_s(T_0)$  и  $\rho(T_0)$  в области аномального скин-эффекта. Отсутствует зависимость  $T_{\text{отж}}^{R_s}$  от степени предварительной де-

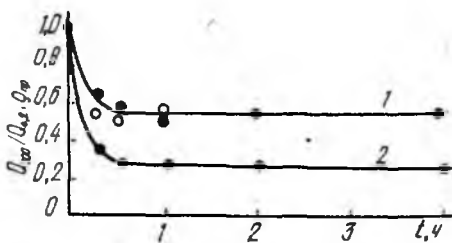


Рис. 3

формации поверхности металлов, а также от предварительного отжига при  $T_0 < T_{\text{опт}}^R$ . Нецелесообразно наносить серебряное покрытие на медные основы с последующим отжигом при  $T_{\text{опт}}^R$ , так как серебряное покрытие превращается в сплав с худшими параметрами, чем медь или серебро. Резонатор, отожженный при  $T_{\text{опт}}^R$ , длительное время сохраняет свои параметры, в то время как отжиг при  $T_0 \neq T_{\text{опт}}^R$  обуславливает изменение добротности во времени. Минимальное время отжига меди при оптимальной температуре для получения максимальных значений добротностей в дециметровом диапазоне не должно быть менее 15 мин. Значение  $T_{\text{опт}}^R$  не зависит от степени чистоты алюминия (А9995 и А997) при той же деформации металла. Термообработка при  $T_{\text{опт}}^R$  повышает добротность резонансных систем в 2,5—3 раза, что может быть полезным при их использовании в качестве селективных цепей, эталонных элементов, в схемах стабилизации частоты, в измерительной технике.

**Список литературы:** 1. *Пренцлау Н. Н., Бескорный А. П., Харченко И. Ф.* Выбор материала для охлаждаемых резонансных систем // *Радиотехника*.— 1986.— Вып. 79.— С. 101—108. 2. *Коваленко В. Ф.* Теплофизические процессы и электровакуумные приборы.— М.: Сов. радио, 1975.— 215 с. 3. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов / Пер. с англ. под ред. Б. Я. Любова.— М.: Мир, 1972.— 408 с. 4. *Свалов Г. Г., Белый Д. И.* Сверхпроводящие и криорезистивные обмоточные провода.— М.: Энергия, 1976.— 167 с. 5. *Fickett F. R.* Aluminum: A review of resistive mechanisms in aluminum // *Cryogenics*.— 1971.— Oct.— P. 367—379.

*Поступила в редколлегию 11.04.86*